

**Ю. А. Расковалова<sup>\*</sup>, В. В. Березовская, С. Б. Михайлов**

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,  
г. Екатеринбург

<sup>\*</sup>*raskovalovaja@gmail.com*

## ВЛИЯНИЕ ХОЛОДНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ВЫСОКОАЗОТИСТОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 07X16AG13M3

Проведены дилатометрические исследования фазовых превращений, протекающих в интервале температур 20–1200 °С в промышленной высокоазотистой (0,82 масс. % N) аустенитной Cr–Mn–Mo-стали после комбинированной упрочняющей обработки, включающей закалку, а также закалку с последующей холодной пластической деформацией. Показано, что ХПД активизирует процесс распада и фазовых переходов аустенита по сравнению с закаленным состоянием.

*Ключевые слова:* высокоазотистая сталь, холодная пластическая деформация, гомогенный распад, мартенсит деформации, эвтектоидное превращение.

***Y. A. Raskovalova, V. V. Berezovskaya, S. B. Mikhailov***

## EFFECT OF COLD PLASTIC DEFORMATION ON PHASE TRANSFORMATIONS IN HIGH-NITROGE AUSTENITIC STEEL 07X16AG13M3

Dilatometric studies of phase transformations taking place in the temperature range of 20–1200 °C in industrial high-nitrogen (0.82 wt % N) austenitic Cr–Mn–Mo steel after combined hardening treatment including quenching and quenching followed by cold plastic deformation were carried out. It is shown that CPD activates the process of decomposition and phase transitions of austenite in comparison with the quenched state.

*Keywords:* high-nitrogen steel, cold plastic deformation, homogeneous decomposition, martensite deformation, eutectoid transformation.

В настоящее время не вызывает сомнения целесообразность и перспективность легирование сталей азотом, что обусловлено комплексом их свойств: высокой прочностью и коррозионной стойкостью, немагнитностью и стабильностью аустенитной структуры в широком интервале температур, и позволяет значительно расширить диапазон свойств и использования материала [1, 2].

Однако в основном имеющиеся в литературе публикации посвящены вопросам влияния и оптимизации химического состава сталей, значительно меньше работ посвящено исследованиям структуры и фазовых превращений в высокоазотистых аустенитных сталях (ВАС) [3, 4]. Недостаточно внимания уделено и исследованиям влияния ХПД на структуру и фазовые превращения ВАС.

В данной работе исследовали промышленную аустенитную коррозионностойкую сталь 07X16АГ13М3 (химический состав, масс. %: С 0,07; Si 0,71; Mn 12,76; Cr 16,16; Ni 0,11; Mo 3,24; N 0,82; V 0,05; P 0,015; S 0,007; Fe – остальное), выплавленную методом электрошлакового переплава под высоким давлением азота. Исходной обработкой стали была горячая пластическая деформация (ГПД) ковкой при 1220–1200 °С с последующими отжигом заготовок в течение часа при 1150 °С и закалкой в воде. В качестве дальнейшей упрочняющей обработки использовали холодную пластическую деформацию (ХПД) прокаткой заготовок в калибрах при комнатной температуре со степенью обжатия 53 %, соответствующей истинной деформации  $\epsilon = 0,8$ .

Металлографические исследования ВАС 07X16АГ13М3 показали, что после горячей деформации в структуре стали (рис. 1, а) рекристаллизационные процессы не были полностью завершены, наблюдались полосы скольжения, искривленность границ зерен. После отжига при 1150 °С процессы рекристаллизации завершились, наблюдалась однородная аустенитная структура с зернами полиэдрической формы, размер которых практически не изменился по сравнению с горячедеформированным состоянием (рис. 1, б). После ХПД со степенью 53 % (рис. 1, в) в структуре стали наблюдались полосы скольжения высокой плотности; волокнистая структура и мартенсит деформации этим методом не выявлены.

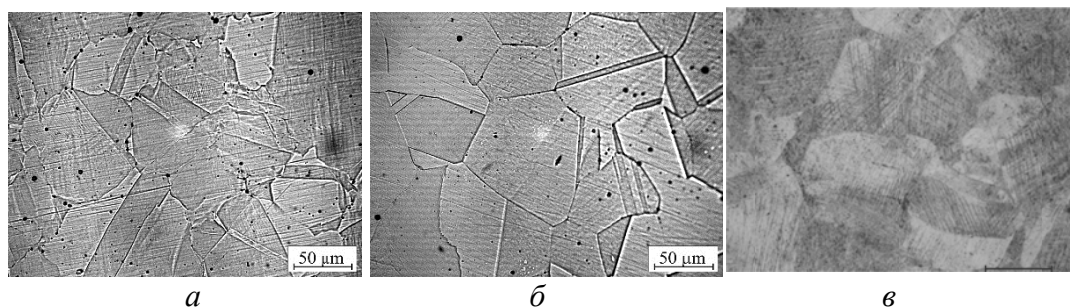


Рис. 1. Микроструктура стали 07X16АГ13М3: а – после ГД 1220–1200 °С; б – закалки от 1150 °С; в – закалки + ХПД

Результаты электронно-микроскопических исследований структуры стали 07X16АГ13М3 после изученных режимов термической и термопластической обработки показаны на рис. 2. На кольцевой

электронограмме общей дифракции электронов закаленной от 1150 °С стали выявлены только линии аустенита (рис. 2, а), отдельные зерна которого имеют полигональную структуру. Выделений избыточных фаз на границах и в теле зерна не выявлено (рис. 2, б). В структуре деформированной стали наблюдалась высокая плотность неравномерно распределенных дислокаций и деформационных двойников; в местах пересечения двойников выявлены единичные кристаллов  $\alpha'$ -мартенсита (рис. 2, в), о чем свидетельствуют слабые рефлекссы ОЦК-фазы на микроэлектронограмме (рис. 2, г). В работе [7] было показано, что сдвиг в кристаллической решетке аустенита стали 07X16АГ13М3 при ХПД протекает как путем скольжения, так и двойникования, при этом двойникование вносит основной вклад в повышение пластичности стали.

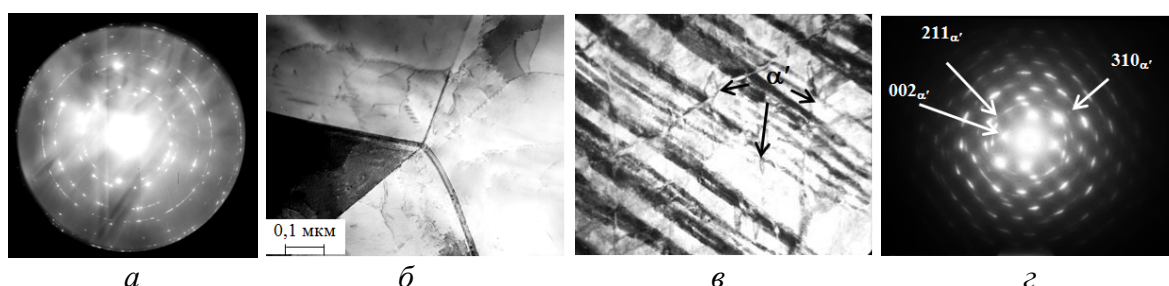
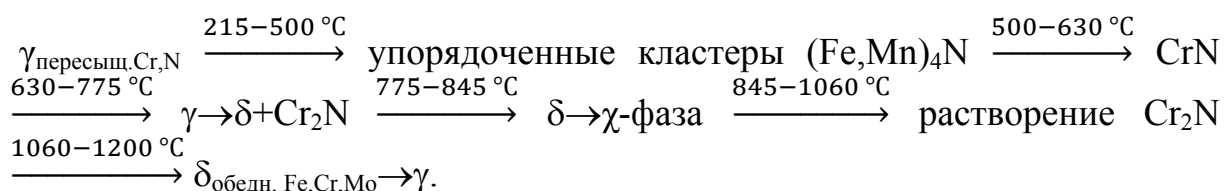


Рис. 2. Структура стали 07X16АГ13М3 после закалки от 1150 °С (а, б) и после комбинированной термопластической обработки (в, г): а, в – общая дифракция электронов; б, г – структура аустенита

Дилатограмма стали 07X16АГ13М3 в исходно аустенитном состоянии после закалки от 1150 °С получена при нагреве с печью ( $V_{\text{нагр.}} = 0,18$  °С/сек) и охлаждения на воздухе ( $V_{\text{охл.}} = 3,5$  °С/сек) – рис. 3. Размерный эффект при нагреве и охлаждении оценивали величиной температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР), который характеризует относительное изменение объёма тела, происходящее в результате изменения его температуры на 1 К при постоянном давлении. С учетом ранее проведенных структурных исследований [5], диаграммы фазового равновесия [6] и литературных данных [7], нагрев в печи дилатометра приводит к следующим фазовым превращениям в стали:



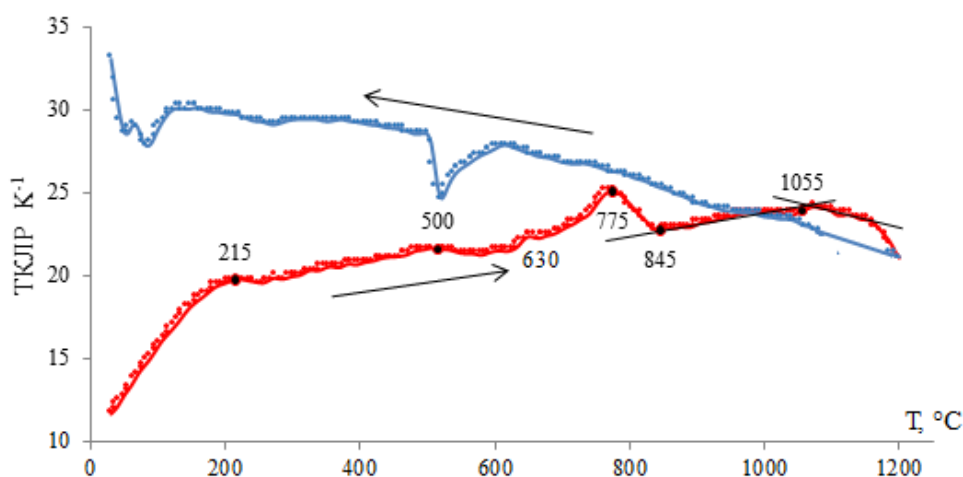


Рис. 3. Дилатограмма стали 07X16AG13M3 после закалки от 1150 °C

При охлаждении превращение, обратное эвтектоидной реакции  $\gamma \rightarrow \delta + \text{Cr}_2\text{N}$ , которое при нагреве имело место при 775 °C, протекает при 500 °C.

Дилатометрический анализ исследованной ВАС, имеющей в структуре после закалки от 1150 °C и ХПД единичные кристаллы деформационного  $\alpha'$ -мартенсита [7] – рис. 2, в, г, проведен в тех же условиях нагрева и охлаждения, результаты показаны на рис. 4.

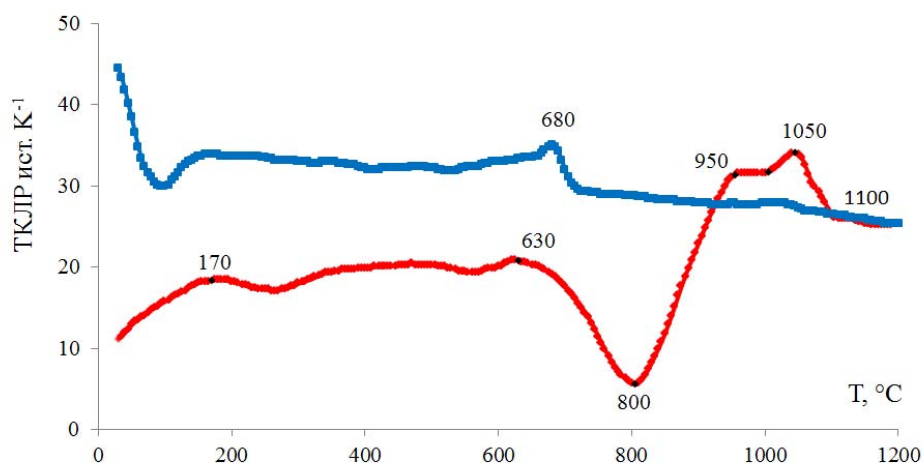
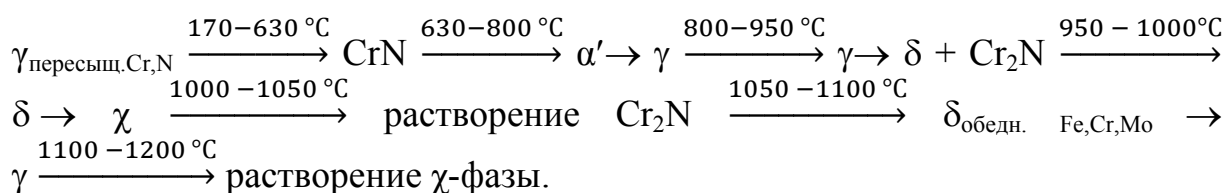


Рис.4. Дилатограмма стали 07X16AG13M3 после закалки от 1150 °C и ХПД

Полученные дилатометрические эффекты с учетом ранее проведенных исследований можно объяснить следующими фазовыми превращениями:



В данном случае процесс выделения нитридов CrN начинается и завершается при более низких температурах; обратное  $\alpha' \rightarrow \gamma$  деформационного мартенсита предшествует эвтектоидному превращению, из-за чего последнее смещено в область более высоких температур почти на 170 °С. При охлаждении деформированной стали после дилатометрического нагрева температура обратного превращения  $\delta + \text{Cr}_2\text{N} \rightarrow \gamma$  также смещается в область более высоких температур на 180 °С.

Таким образом, холодная пластическая деформация ВАС 07Х16АГ13М3 ускоряет процесс выделения нитридов CrN; в присутствии деформационного мартенсита температура полиморфного превращения  $\gamma \rightarrow \delta + \text{Cr}_2\text{N}$  смещается при нагреве и охлаждении в область более высоких температур. Кроме того, несмотря на образование  $\delta$ -феррита при нагреве стали, после охлаждения аустенитная структура сохраняется, благодаря обратному полиморфному превращению, согласно  $\gamma \rightleftharpoons \delta + \text{Cr}_2\text{N}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шпайдель М. О. Новые азотосодержащие аустенитные нержавеющие стали с высокими прочностью и пластичностью / М. О. Шпайдель // *МиТОМ*. 2005. № 11. С. 9–13.
2. Balachandran G. Development of high nitrogen steel materials / G. Balachandran // *Proceedings of 11<sup>th</sup> International conference «High Nitrogen Steels and Interstitial Alloys» (HNS 2012)*. Chennai. 2013. P. 41–62.
3. The microstructure of Fe–18%Cr alloys with high N contents / Y. Ustinovshikov [et al.] // *Acta mater.* 1996. 44 (3). P. 1119–1125.
4. Microstructure and properties of the high-nitrogen Fe–Cr austenite / Y. Ustinovshikov [et al.] // *Mater. Sci. eng. A*. 1999. Vol. 262(1–2). P. 82–87.
5. Влияние деформации на структуру, механические и коррозионные свойства высокоазотистой аустенитной стали 07Х16АГ13М3 / В. В. Березовская [и др.] // *Металлы*. 2013. № 6. С. 54–62.
6. Соколовская Ю. А. Определение температурного интервала рекристаллизации на основе структурных исследований аустенитной высокоазотистой Cr–Mn–Mo-стали / Ю. А. Соколовская, В. В. Березовская // *Металлы*. 2015. № 2. С. 48–53.
7. Bottger A. J. Order-disorder transitions in high-nitrogen steels: from ab-initio to statistical thermodynamics / A. J. Bottger, D. E. Nanu, A. Marashdeh // *In Proceedings of 10<sup>th</sup> International Conference on High Nitrogen Steels (MISiS, Moscow)*. 2009. P. 31–34.